

1799 年金沢地震における地盤震動分布と起震断層の推定

宮 島 昌 克¹・佐々木 伸 安²・北 浦 勝³

(2001 年 8 月 31 日受付, Received August 31, 2001)

(2001 年 10 月 16 日受理, Accepted October 16, 2001)

Estimation of Ground Motion Distribution and Its Seismogenic Fault in the 1799 Kanazawa Earthquake

Masakatsu MIYAJIMA¹・Nobuyasu SASAKI²・Masaru KITaura³

1. はじめに

寛政 11 年 5 月 26 日 (1799 年 6 月 26 日) 午後 4 時すぎ, 突如として大地が揺れ動き, 金沢城をはじめとする加賀藩の中核地域は著しい被害を蒙った。強震地域は河北郡高松町から松任市までの約 40 km の範囲に及んだ。当時, 10 万人を越える人口を有した, 日本海側を代表する大都市金沢に被害が集中したため, 地震に関する詳細な記録が残っている。したがって, この地震による被害の状況やその分布を検討し, 金沢市周辺の活断層との関係を明らかにすることによって, この地震を引き起こした活断層を特定できる可能性がある。「加賀百万石を襲った大鯨」と形容される江戸時代を代表する直下型地震の解明によって 200 年前に放出された地下のエネルギーの規模を知り, 今後起こりうる地震の可能性を描き出すことで, 石川県や金沢市が進める地震対策に反映させることができると考えられる。

そこで本研究では, 古文書等の史料に残る当時の被害状況を把握し, 地震動の大きさやその分布を推測することにより, 地震を引き起こした断層を推定するための基

礎データを得ることを目的とする。

2. 地震と被害の概要

寛政 11 年 5 月 26 日 (1799 年 6 月 26 日) 午後 4 時すぎ, 金沢で被害が最大となる地震が発生した。宇佐美はマグニチュード 6.0 の地震規模を推定している¹⁾。また寒川は, この地震の被害状況を文献と実地調査に基づき詳しく調べている²⁾。そこに見られる被害状況と旧気象庁震度階級³⁾をもとに各地の被害状況を把握し震度を推定した。

2.1 金沢城の被害

金沢城では, 石川門など城内各地で石垣の崩壊・破損, 屋敷・土塀・土蔵など多くの構造物の被害が見られた。また石川門付近など城内各地で地割れ (中には段差) が発生した。

このように金沢城では, 石垣が深刻な被害を蒙っており, 現在整備が進む金沢城公園の耐震補強策にも考慮が必要であると考えられる。また, 城内では地震動被害だ

¹金沢大学工学部土木建設工学科: Department of Civil Engineering, Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa, Japan, Zip. 920-8667

²金沢大学大学院自然科学研究科博士前期課程環境基盤工学専攻: Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa, Japan, Zip. 920-8667

³金沢大学大学院自然科学研究科地球環境科学専攻: Graduate School of Natural Science and Technology, Kanazawa University, 2-40-20 Kodatsuno, Kanazawa, Japan, Zip. 920-8667

される。浅野川より北東の大樋町では水田の水が東西に大きく傾き、松並木が五～六尺も揺れ、激しい液状化現象が発生しており、卯辰町周辺でも亀裂が多く生じ寺庵・墓地が大破している。震度6以上が推定される。犀川より南西の野町、寺町等では寺院、家屋が密集しているが、顕著な被害は生じておらず震度5以下が推定される。野田山では藩主前田家の墓地で石灯籠が倒れ震度5が推定される。

3. 各地の加速度の推定

3.1 各地の加速度

旧気象庁震度階級と加速度を対応させ各地の加速度を推定する。河角は気象庁の旧震度と地震動の最大加速度の関係を次のように与えている⁴⁾。

$$\log \alpha = \frac{I}{2} - 0.6$$

ここに、 α ：震度 I とそれよりも1階級下の震度との境界に対応する地震動の最大加速度 (gal)

I ：気象庁震度階級による震度

上式をもとに震度と加速度の対応を表1のように定め、各地の加速度を推定した。

浅野川より北東の大樋町から卯辰町にかけての地域は250 gal以上、金沢城およびその周辺の城下町では250 gal以上、金沢市街南東部の小立野およびその周辺では250 gal以上、犀川より南西の野町、寺町などの地域では80 gal～250 gal、野田山では80 gal～250 galが推定された。

表1 震度と加速度の対応

加速度 (gal)	震度
0.8以下	0
0.8～2.5	1
2.5～8.0	2
8.0～25.0	3
25.0～80.0	4
80.0～250.0	5
250.0～400.0	6
400.0以上	7

3.2 液状化現象からの考察

郊外においては、大崎から宮腰にかけての南北10数kmの範囲の砂丘及び後背湿地で著しい被害が発生しているが、ここでの被害の大部分は液状化現象に伴うものであり、被害状況から直接震度を推定することが困難であった。そこで、この地域の地盤がどの程度の加速度で液状化するかを調べることによって地盤震動の大きさを

検討した。その方法として、これらの地域のボーリングデータから最新の道路橋示方書⁵⁾による液状化に対する抵抗率 F_L 値を算出する。この F_L 値が1.0以下となる土層については液状化するとみなす。したがって、地表面加速度がどの値のときに、この F_L 値が1.0より大きい値から1.0以下になる境界があるかを調べれば、これらの地域の加速度は、少なくともその値以上であったと考えることができる。また、ある層が液状化しても表層に厚い非液状化層が存在すれば、地表に噴砂・噴水は生じない可能性があると考えられる。石原は、地表面最大加速度が200 gal程度の地震力に対しては、表層に2～3m以上の非液状化層があると下層が液状化しても地表に噴砂・噴水は生じないとしている⁶⁾。これを参考にして本研究では、地表面から5mまでに液状化層が存在しなければ、古文書等に記述が残るほどの噴砂・噴水が地表に現れることはないものとして、解析結果を解釈した。今回解析を行った地域とボーリングデータ数を表2に示す。解析結果は各地域ごとにばらつきがあり、特定が非常に難しいが、中でも最小の値をその地域の加速度の下限值であると考えた。これにより海岸沿いの砂丘地域の加速度の下限值を表3に示すように推定した。

表2 解析地域とデータ数

地域名	ボーリングデータ数
大根布	5
大崎	5
普正寺	2
金石	16
宮坂	1
粟崎	8

表3 加速度の下限值

地域名	加速度の下限值 (gal)
大根布	146
大崎	150
普正寺	115
金石	88
宮坂	96
粟崎	98

なお、本研究では、これらの地域において、金沢地震が起こった約200年前と現在とでは、表層地盤にそれほど変化はないものと考えられている。

4. 被害の分布と活断層位置

寒川によると、金沢市内には約20 kmにわたって北東－南西方向に延びる金沢活断層系が発達している。この活断層系は、図2に示すように森本断層、野町断層、富樫断層によって構成されている。

森本断層は、津幡から浅野川大橋付近にかけて約 12 km にわたって発達し、丘陵と沖積低地を限る南東側隆起の撓曲崖（断層運動により地表付近の地層が切断されずに撓み曲がることにより生じた崖）を形成している。撓曲崖に沿って、更新世前期の卯辰山層が 30～50 度北西へ傾斜している。野町断層は犀川大橋から寺地町にかけて、南北方向に約 3 km の長さで発達している。この断層に沿って更新世後期の扇状地面が西へ傾斜し、撓曲崖を形成している。富樫断層は山科町から鶴来町にかけて約 10 km にわたって、北東－南西方向にのび、丘陵と沖積低地を限る南東または東側隆起の撓曲崖を形成している。これらの活断層は、更新世中・後期に西北西～東南東方向の圧力を受けて活動している逆断層であると推定されてきた。森本断層、富樫断層は、顕著な撓曲崖を形成し、地層を著しく変形させていることにより、長期間にわたって繰り返し断層活動を行ってきたものと考えられる。野町断層は両断層と比較してかなり短く、地表では泉野面を変位させていることが認められているのみである⁷⁾。

寛政の金沢地震において、被害の著しい地域は砂丘地域を除けば、大部分が森本断層に沿っている。海岸平野に連続的に分布する砂丘地でも、森本断層に平行する長さ 10 km 前後の範囲で著しい被害が生じている。一般に、断層の中央部は度重なる活動によってすりつぶされ、摩擦が少なくなっていることが多い。したがって、断層の末端部や隣の断層との境に新しい破壊が生じがちである。森本断層の場合も、断層の南西端の野町断層に移行する地域で最も激しい地震動が起りやすいと考えられる。このような点から寒川は、寛政の金沢地震は主として森本断層の活動によって生じた可能性が強いと考えられるとしている²⁾。古文書には「屋根石は 1 尺（30 cm）飛び上がり、地面は大波のごとく（揺れ）」、「灯籠、的場（弓矢の練習場）あるいは築山（庭に築いた山）などにあるものは、竿石のままに、6 尺（1.8 m）ばかり飛び上がり、落ちるときに四方へ倒れた。」といった記述が見られ、金沢城周辺は、地震動に伴う上下動が激しかったことがわかる。断層から離れるほど上下動は減衰しやすく、上下動が激しかった金沢城周辺は断層近傍であったことが伺える。

しかしながら、森本断層から遠く離れた野田山で著し

い被害の記述がある。また寒川は否定しているが、金石で津波が発生したといった記録がある^{8),9)}。さらに宇佐美は震源を金沢港付近としている¹⁾。したがって断層が海中にまで伸びており、津波が発生した可能性も考えられる。また、石渡は金沢地震と森本断層を結びつける考えにいくつかの疑問点を挙げ、金沢地震を起こした断層は南北ないし北北西走向だった可能性があるとしている¹⁰⁾。

平成 8 年度から 3 ヶ年にわたって、石川県が科学技術庁の補助を受けて森本断層の調査を行った結果、約 6,000 年前に活動した可能性が高く、2,000 年前に活動したことが確実であることが明らかになったが、金沢地震の 200 年前に活動した形跡は見つかっていない¹¹⁾。

このように、古文書の記述のみから起震断層を特定することは非常に難しく、他にも未知の断層が存在している可能性がないかも考慮に入れて研究を深める必要がある。

5. 地震動のシミュレーションによる最大加速度分布推定

これまでに述べてきたように、古文書の記述のみから起震断層を特定することは非常に困難である。そこで断層を想定した強震動シミュレーションを行い、そこで得られた結果と古文書から推定した結果とを比較することによって起震断層を推定する。

5.1 福島・田中の式を用いた基盤面最大加速度分布推定

地震動は震源から岩盤を伝わって当該地点直下の基盤に達し、その上位にある地盤で増幅されて地表に伝わる。したがって、地表の地震動を求める場合には、まず工学的基盤における地震動を決定しておく必要がある。これにはいくつかの方法があるが、本解析では距離減衰式を用いた方法を適用した。

福島・田中は日本で発生した地震のデータにカリフォルニアなどの震源距離が近いデータを加えて、

$$\log A_{\max} = 0.51M - \log(R + 0.006 \cdot 10^{0.51M}) - 0.0033R + 0.59$$

により¹²⁾、マグニチュード M と観測点から震源断層までの最短距離 R を用いて工学的基盤面最大加速度 A_{\max} を

求める。

兵庫県南部地震で観測された水平最大加速度と福島・田中の距離減衰式から予測される水平最大加速度とを比較したところほぼ等しくなっており、この経験式が比較的簡潔なものであるにもかかわらず、その距離減衰の傾向がうまく説明されていることがわかる。

5.2 重複反射理論による等価線形解析(SHAKE)を用いた地表面最大加速度分布推定

工学的基盤に入射した地震波は地盤中で増幅されながら伝播するため、工学的基盤における加速度をそのまま地表面の加速度として用いることはできない。そこで、重複反射理論を用いた等価線形解析法により地表面における加速度を計算する。等価線形解析では、地盤をいくつかの薄い層に分割し、その中ではせん断弾性係数と減衰定数が深さ方向に変化せず、等価ひずみだけの関数からなると仮定する¹³⁾。ここでは SHAKE¹⁴⁾という解析コードを用いた。

5.3 想定地震

ここでは、金沢市をほぼ北東から南西に横切る形で存在している森本断層を起震断層と想定した。断層の位置は金沢市地域防災計画〔震災対策編〕¹⁶⁾を参考に決定した。マグニチュードは宇佐美¹⁾のものを採用し6.0とした。その結果、マグニチュード M と断層長さ L の関係式、いわゆる松田の式¹⁵⁾

$$\log L = 0.6M - 2.9$$

より、断層長さは5 km となる。一方、金沢市地域防災計画〔震災対策編〕¹⁶⁾ではマグニチュード6.7を想定しており、森本断層の長さは14 km となっている。同じ断層が活動した地震でも破壊開始点の位置によって地震動分布が変わることはわかっているが、森本断層のどこから破壊が始まったかは推定できない。そこで、金沢市が想定している断層の北東端から5 km が破壊した場合(ケース1)と南西端から5 km が破壊した場合(ケース2)の2ケースで解析を行った。それぞれのケースにおける想定断層の位置およびパラメータを図3、図4および表4、表5に示す。また福島・田中の式では工学的基盤における最大加速度のみしか求まらないため、SHAKEに入力する工学的基盤における加速度波形には、1995年兵

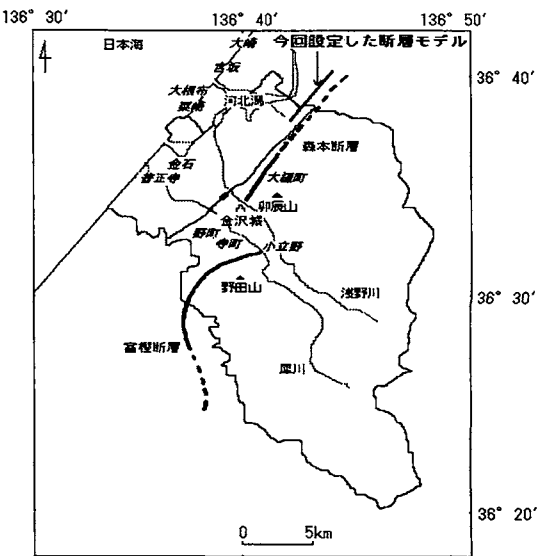


図3 ケース1における断層位置

表4 ケース1における断層パラメータ

マグニチュード M		6.0
長さ L (km)		5.0
走行 $\theta(^{\circ})$		215(N35° E)
北東端点	136.738° E	36.670° N
南西端点	136.706° E	36.633° N

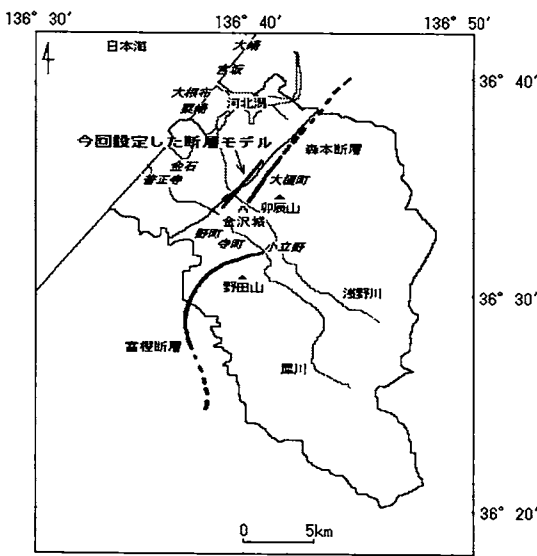


図4 ケース2における断層位置

表5 ケース2における断層パラメータ

マグニチュード M		6.0
長さ L (km)		5.0
走行 $\theta(^{\circ})$		215(N35° E)
北東端点	136.680° E	36.604° N
南西端点	136.684° E	36.567° N

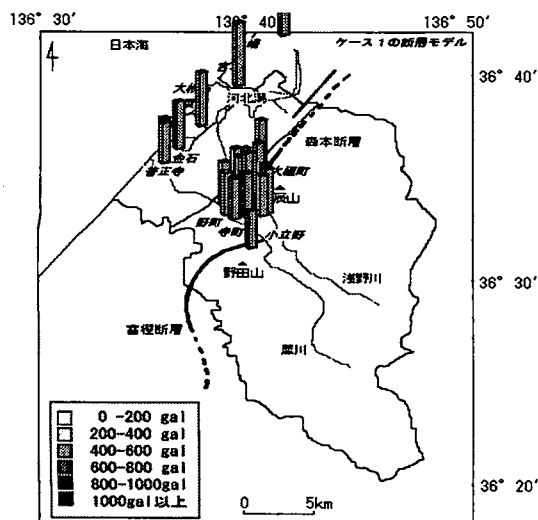


図5 ケース1における基盤面加速度分布

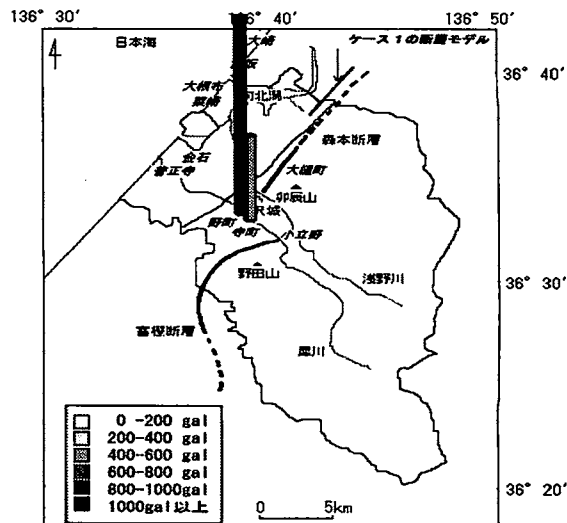


図7 ケース1における野町・寺町の地表面加速度分布

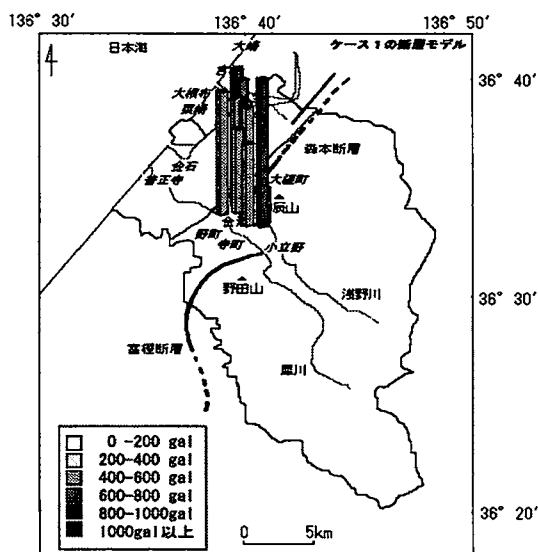


図6 ケース1における城下町の地表面加速度分布

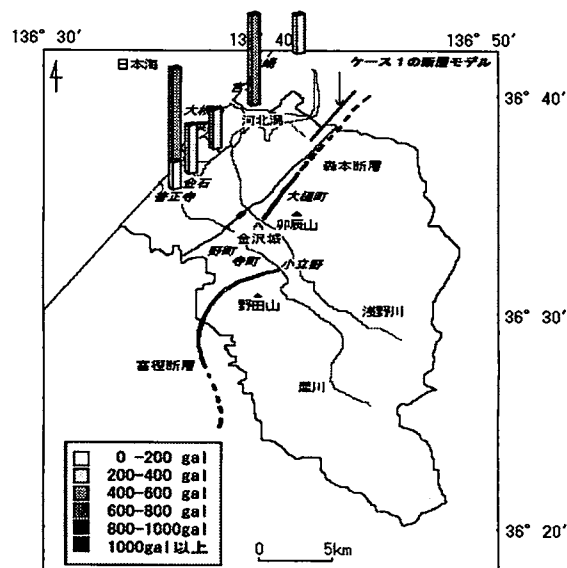


図8 ケース1における海岸沿いの地域の地表面加速度分布

庫県南部地震において神戸大学の岩盤で観測された波形を用い、福島・田中の式から求めた各地の工学的基盤面最大加速度で基準化した。

上述した方法による解析結果を図5から図12に、また、古文書の記述から推定した各地の震度と解析結果から求めた震度を表6に示す。ここで、野田山、大磯町、卯辰山、橋場町、田井町については適当地盤データを入手できなかったため、地表面最大加速度を求めることができなかった。図5に示すケース1では工学的基

盤面において、断層から約7 kmの範囲内にある大崎、宮坂で約360 galの最大加速度が推定された。また、断層から8 kmから9 kmの範囲内にある金沢城および城下町にあたる地域では250 galから300 galの最大加速度が推定された。次に、図6から図8に示す地表面最大加速度の分布を見ると、金沢城および城下町にあたる地域で400 galから700 gal程度の最大加速度が推定された。また工学的基盤面において大きな最大加速度が推定された地域については、宮坂ではやや増幅した450 gal程度の

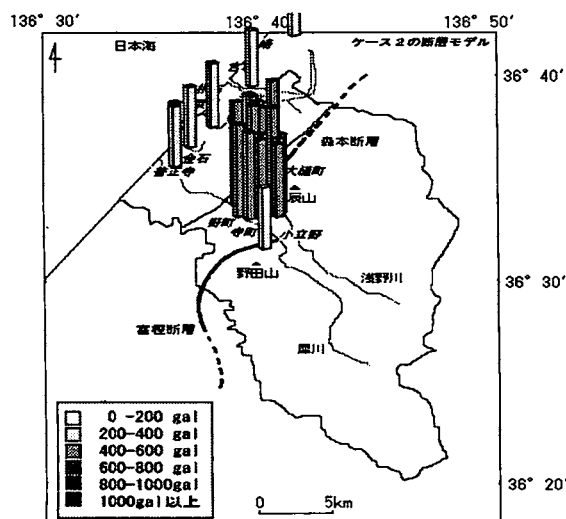


図9 ケース2における基盤面最大加速度分布

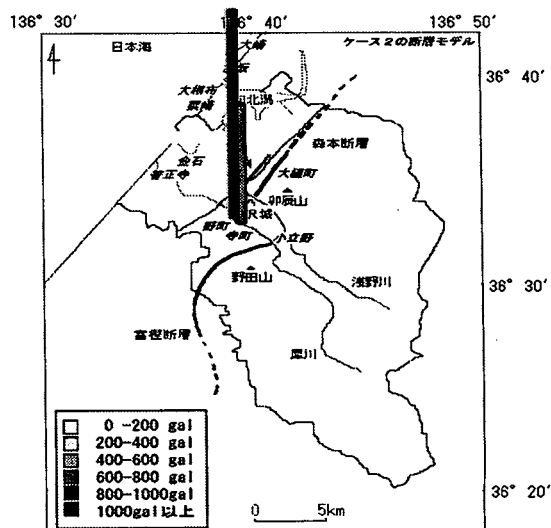


図11 ケース2における野町・寺町の地表面加速度分布

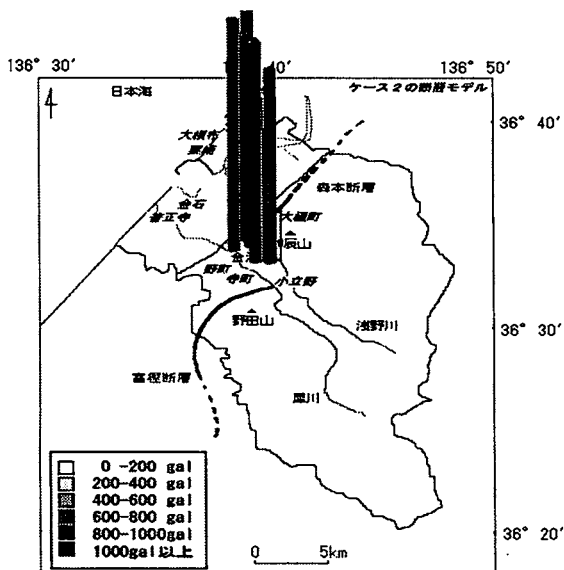


図10 ケース2における城下町の地表面加速度分布

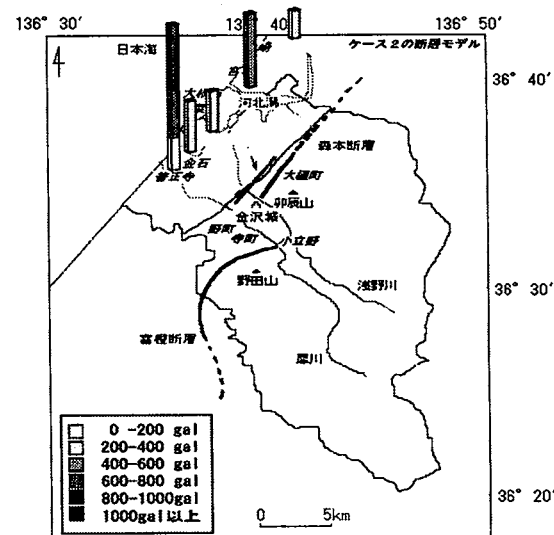


図12 ケース1における海岸沿いの地域の地表面加速度分布

最大加速度が推定されたが、大崎については減衰した200 gal程度の最大加速度が推定された。普正寺、大根布、粟崎でも最大加速度の減衰の傾向が見られた。また、野町では980 gal、小立野では730 galと非常に大きな最大加速度が推定された。図6を見ると、金沢地震において被害が著しかった金沢城および城下町の地域では、大きな加速度が得られており、古文書の記述と一致している。しかしながら、図7では古文書に被害の記述のない野町、寺町でも大きな加速度が得られており、対応していない。

ちなみに、図8を表3と照らし合わせると、十分液状化が発生しうる加速度となっている。

ケース2では図9に示すように、工学的基盤面において、断層から非常に近い約1 kmまたは2 kmの範囲内にある金沢城や城下町にあたる地域で、450 galから600 gal程度の最大加速度が推定された。また、断層から約10 kmの範囲にある大崎では150 gal程度、断層から約5 kmから6 kmの範囲内にある海岸沿いの地域では300 galから400 gal程度の最大加速度が推定された。次に、

図 10 から図 12 に示す地表面最大加速度の分布を見ると、金沢城および城下町にあたる地域において推定された最大加速度は 600 gal 以上で、最大で 1200 gal 前後の非常に大きな最大加速度が推定された。また、大崎、普正寺、大根布、粟崎では最大加速度が工学的基盤面と比べて減衰し 150 gal から 300 gal 程度が推定された。また、野町では 1120 gal、小立野では 1050 gal と非常に大きな最大加速度が推定された。図 10 を見ると、金沢地震において被害が著しかった金沢城および城下町の地域では、ケース 1 以上に大きな加速度が得られており、古文書の記述以上の被害が出ると考えられる。さらに、図 11 では古文書に被害の記述のない野町、寺町でもケース 1 以上に大きな加速度が得られており、対応がよくない。また、図 12 を表 3 と照らし合わせると、十分液状化が発生しうる加速度となっている。

以上の結果を見ると、野町や小立野では工学的基盤面で推定された最大加速度と比べて地表面での最大加速度は非常に大きな値となった。これらの地域の地盤データを見ると、ある程度固い地盤から急激に軟弱な地盤に変化する層が存在しており、それが最大加速度の増幅に影響したものと考えられる。これとは反対に、大崎、普正寺、大根布、粟崎では、工学的基盤面で推定された最大加速度と比べて地表面で推定された最大加速度は減衰した値となった。一般的に軟弱地盤では、地震波が工学的基盤から表層地盤を伝播する際には増幅すると考えられるが、これらの地域の地盤は極端に軟弱であるために、増幅せず逆に減衰したのと考えられる。この様にそれほど離れていない 2 地点においても、地盤条件の差によって増幅率が異なり、地盤の増幅率が大きいところでは、断層から離れていても地表面最大加速度は大きなものとなり、逆に地盤の増幅率が小さいところでは、断層付近であっても地表面最大加速度はそれほど大きくならない可能性がある。したがって、必ずしも、地表面最大加速度が大きい地域の付近に起震断層が存在しているとは言いきれない。このことから、古文書の記述からだけでは起震断層を推定することが難しいと言える。また、ケース 2 については、断層から非常に近距離にある金沢城および城下町にあたる地域では工学的基盤面と地表面両方において大きな加速度が推定されているが、工学的基盤面における最大加速度を推定する際に用いた福島・

表 6 古文書から推定した震度および解析から求めた震度

サイト	古文書から推定した震度	ケース 1 から求めた震度	ケース 2 から求めた震度
金 沢 城	6～7	7	7
大 手 先	6～7	7	7
近 江 町	6～7	7	7
彦 三 町	6～7	7	7
味噌蔵町	6～7	7	7
尾 張 町	6～7	7	7
長 町	6～7	7	7
本 多 町	6～7	7	7
小 立 野	6～7	7	7
新坂・嫁坂	6～7	5	7
鶴 間 谷	6～7	7	6
野 町	5	7	7
寺 町	5	7	7

田中の式は、近距離にも適用可能とはしているものの、回帰式を得る際に用いたデータに震源近傍のものはそれほど多くないため、断層最短距離が非常に短いものに用いる場合は限界がある可能性があり、このことが大きな最大加速度が推定されたことに影響した可能性が考えられる。

次に、古文書から震度を推定した地域と解析から震度を推定した地域を比較すると、表 6 に示すように、解析から推定した震度がほとんど震度 7 となり、相関が高いとは言いきれない。特に、野町や寺町については、古文書には被害が少なかったという記述が見られるにもかかわらず、解析では震度 7 が推定されている。このように、今回設定した森本断層における強震動シミュレーション結果と古文書の記述にある被害とは必ずしも一致しておらず、森本断層を寛政 11 年(1799 年)の金沢地震の起震断層と特定することはできない。すなわち、森本断層が起震断層である可能性は低いと考えられる。したがって、金沢地震の起震断層について他の可能性を検討する必要がある。また、今回はマグニチュードと断層最短距離のみをパラメータとした距離減衰式を用いた簡易な手法により強震動シミュレーションを行っている。これには森本断層から発生した地震波の振動数特性は考慮されておらず、今回は兵庫県南部地震において神戸大学の岩盤で観測された波形を基盤入力波形として用いているため、この地震波における振動数特性で解析が行われている。

卓越振動数の違いにより、異なる結果が出る可能性が十分に考えられるので、今後はより詳細な方法を用いて振動数特性等を考慮した強震動シミュレーションを行っていく必要がある。

6. 結 論

- 1) 寛政 11 年 (1799 年) の金沢地震について、寒川の見解をもとに古文書に記述のある地域の震度を旧震度階級に対応するように推定し、さらに旧震度階級と加速度の対応を決め、各地の加速度を推定した。
- 2) 古文書に記述のある地域のうち、液状化現象と推定される記述のある地域に関しては、現在のボーリングデータを用いて F_L 値を算出することにより加速度の下限値を推定した。
- 3) 寛政 11 年 (1799 年) の金沢地震において被害が著しかった地域の大部分は森本断層に沿っていることがわかったが、断層から遠く離れた野田山で被害が著しいことや津波が発生したといった記述が古文書に残っていることなどから、古文書の記述のみからは起震断層の特定には至らなかった。
- 4) 古文書の記述のみからでは、寛政 11 年 (1799 年) の金沢地震起震断層の特定は困難であったため、起震断層を森本断層と想定し、マグニチュードを決め、距離減衰式の福島・田中の式と重複反射理論を用いた等価線形解析法プログラム SHAKE を用いて地表面加速度を推定した。その結果、古文書の被害の分布とシミュレーションの結果が必ずしも一致せず、森本断層を寛政 11 年 (1799 年) の金沢地震の起震断層として特定することはできず、森本断層が起震断層である可能性は低いと考えられた。

以上が本研究で得られた成果である。今後は、本研究で得られた基礎データをもとに、より詳細な方法として、

震源特性・伝播経路特性・サイト増幅特性を考慮した最新の手法を用いて強震動シミュレーションを行い、寛政 11 年の金沢地震の起震断層を特定する予定である。

謝辞：本研究の遂行にあたり、財団法人 地域 地盤 環境研究所の鶴来雅人氏には終始丁寧なご指導と御助言を賜りました。ここに心より厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 宇佐美龍夫：資料 新編 日本被害地震総覧，東京大学出版会，1987。
- 2) 寒川旭：地震考古学，中公新書，1992。
- 3) 気象庁：地震観測指針（観測編），1978。
- 4) 河角広：震度と震度階，地震，Vol. 15, pp. 6-121, 1943。
- 5) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，pp. 83-97, 1996。
- 6) Ishihara.K.: Stability of Natural Deposits during Earthquakes, 11th Int. Conf. on Soil Mech. Foundation Engrg., Vol. 1, pp. 321-376, 1985。
- 7) 寒川旭：寛政 11 年 (1799 年) 金沢地震による被害と活断層，地震 第 2 輯，地震学会，Vol. 39, pp. 653-663, 1986。
- 8) 遠藤通：救荒便覧，有隣堂，1886。
- 9) 和田文次郎：金沢叢語，加越能史談会，1925。
- 10) 北國新聞出版局編：徹底検証 地震と防災 石川は安全か，pp. 48-61, 1995。
- 11) 石川県：森本断層系に関する調査報告書，1997。
- 12) 福島美光，田中貞二：新しいデータベースを用いた最大加速度の距離減衰式の改訂，地震学会講演予稿集，No. 2, p. 116, 1992。
- 13) 土岐憲三：新体系土木工学 11 構造物の耐震解析，技報堂出版，pp. 82-90, 1981。
- 14) Shanabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B.: SHAKE, A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Site, Report No. EERC72-12, University of California, Berkeley, 1972。
- 15) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について，地震，第二輯，地震学会，Vol. 28, pp. 269-283, 1975。
- 16) 金沢市：金沢市地域防災計画 [震災対策編]，金沢市防災会議，pp. 7-138. 1999。